## 1 - INTRODUCCIÓN

Desde la confirmación de la destruicción de la capa de ozono por los CFCs y de las restricciones impuestas por el Protocolo de Montreal a la utilización destes refrigerantes en 1987, EMBRACO empezo un plan intensivo de investigación, visando desarrollar compresores que sean adecuados al uso de nuevos refrigerantes alternativos.

Durante los ultimos años, varios refrigerantes alternativos han sido evaluados y, el R 134a, por presentar propiedades físicas y termodinamicas relativamente similares al R 12 y por no contener Cloro que destruye la capa de ozono, ha sido considerado el sustituto del R 12 en sus aplicaciones.

Recientemente, otro fator ambiental, también importante la destrucción de la capa de ozono, ha sido considerado: el potencial de calentamiento global, mas conocido como efecto envernadero.

Dentre los refrigerantes alternativos que atienden ambas caracteristicas ambientales, estan los hidrocarbonos. Estes refrigerantes no habian aún sido considerados como alternativos a sustitución al R 12, pues son inflamables.

El objectivo deste informativo es describir en detalles, el potencial de utilización de los refrigerantes hidrocarbonos y su impacto en el projecto actual de los compresores y dispositivos de expansión de los sistemas de refrigeración doméstica.

## 2 - PROPIEDADES FÍSICAS Y IMPACTO AMBIENTAL

El la tabla 1 son presentadas las principales propiedades físicas de los refrigerantes hidrocarbonos comparadas a las del R 12 y R 134a.

TABLA 1 - Propiedades físicas del R 12, R 134a y refrigerantes hidrocarbonos.

| REFRIGERANTE | ESTRUCTURA MOLECULAR | PESO MOLECULAR | TEMPERATURA CRÍTICA (ºC) | PRESIÓN CRÍTICA (bar) | PUNTO DE EBULICIÓN (ºC) |
|---|---|---|---|---|---|
| • R 12 | F-C(F)(Cl)-Cl | 120,9 | 111,8 | 41,8 | - 29,8 |
| • R 134a | F-C(F)(F)-C(H)(H)-F | 102,0 | 101,2 | 40,6 | - 26,0 |
| • PROPANO (R 290) | $H_3C$-C(H)(H)-$CH_3$ | 44,1 | 96,7 | 42,4 | - 41,7 |
| * BUTANO (R 600) | $H_3C$-C(H)(H)-C(H)(H)-$CH_3$ | 58,1 | 151,0 | 37,2 | - 0,5 |
| * ISOBUTANO (R 600a) | $H_3C$-C(H)($CH_3$)-$CH_3$ | 58,1 | 136,1 | 36,8 | - 11,7 |

Fuente: • Programa Refprop
* Catalogo Matheson

Como se puede observar en la tabla 1, los refrigerantes hidrocarbonos presentan menor peso molecular cuando comparados al R 12 y R 134a. Esto es debido a la ausencia de halogenos como cloro y fluor en su estructura molecular, que es compuesta solamente de carbono hidrógeno.

Tal característica hace con que los hidrocarbonos sean mas amistosos con el medio ambiente como está representado en la tabla 2.

TABLA 2 - Impacto ambiental de los refrigerantes hidrocarbonos, R 12 y R 134a

| REFRIGERANTE | ODP | GWP | TIEMPO DE VIDA |
|---|---|---|---|
| R 12 | 1,00 | 7100 | 120 años |
| R 134a | 0 | 3200 | 16 años |
| PROPANO (R 290) | 0 | < 5 | meses |
| BUTANO (R 600) | 0 | < 5 | semanas |

Fuente: 3º Report de la comisión de inquisición del parlamento alemano “Protection of the Atmosphere” (protección de la atmosfera), 1990
ODP = Potencial de Destrucción del Ozono
GWP = Potencial de Calentamiento Global (comparado al $CO_2$)

Observase también en la tabla 2 que los refrigerantes hidrocarbonos a ejemplo del R 134a, no destruyen la capa de ozono (ODP = 0). Tal caracteristica debese a la ausencia del Cloro en sus moleculas. Además, los refrigerantes hidrocarbonos ejercen efectos desprezibles (GWP < 5) sobre el calentamiento de la Tierra, al contrario del R 12 y R 134a.

Otro fator ambiental favorable a los refrigerantes hidrocarbonos presentados en la Tabla 2, es el menor tiempo de vida en la atmosfera.

## 3 - FLAMABILIDAD Y TOXICIDAD

La flamabilidad de un fluido es representada por sus límites inferiores (LEL) y superiores (UEL) de explosión. Tales límites, cuya diferencia son conocidas como límite de flamabilidad, representan la minima y la máxima concentración de un gas en el aire, que cuando sometido a una fuente de ignición, promove la propagación de llama, siendo o no continuada la aplicación de la fuente de ingnición.

Cuanto mayor es el valor del LEL, mas facilmente es evitada la formación de una mescla inflamable como presenta la Tabla 3.

TABLA 3 - Límites de flamabilidad y toxicidad de los refrigerantes comparados al R 12 y al R 134a.

| REFRIGERANTE | TOXICIDAD | FLAMABILIDAD EN AL AIRE (% por Volume) LEL | UEL |
|---|---|---|---|
| * R 12 | TLV = 1000ppm | NO FLAMABLE | |
| * R 134a | AEL - 1000ppm | NO FLAMABLE | |
| • PROPANO (R 290) | BAJA | 2,1 | 9,5 |
| • BUTANO (R 600) | LEVEMENTE ANESTÉSICO TLV = 800ppm | 1,8 | 8,5 |
| • ISOBUTANO (R 600a) | LEVEMENTE ANESTÉSICO TLV = No Establecido | 1,8 | 8,5 |

TLV = Valor Límite "Threshold" (ACGIH)
AEL = Límites de exposición permisibles (DuPont)
Fuente: • Catalogo White Martins
* Catalogo DuPont

Observase también en la tabla 3 que los refrigerantes presentam toxicidad similar al R 12 y R 134a.

## 4 - PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y ANALISIS TEORICA EN EL CICLO ASHRAE

Con el objectivo de observar el impacto de la sustitución del R 12 por los refrigerantes hidrocarbonos, son presentadas en las figuras a seguir, las principales características termodinámicas y el desempeño teórico del ciclo ASHRAE de los refrigerantes hidrocarbonos en relación al R 12 y R 134a.

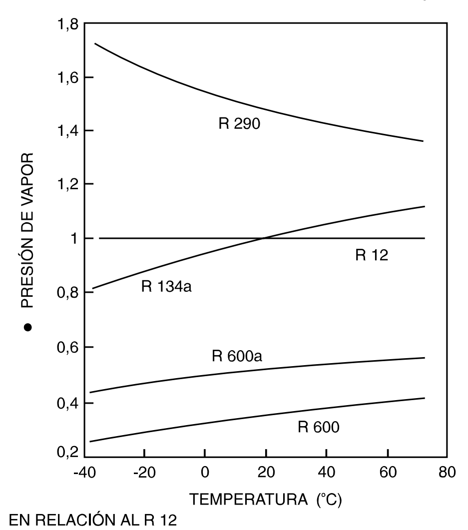
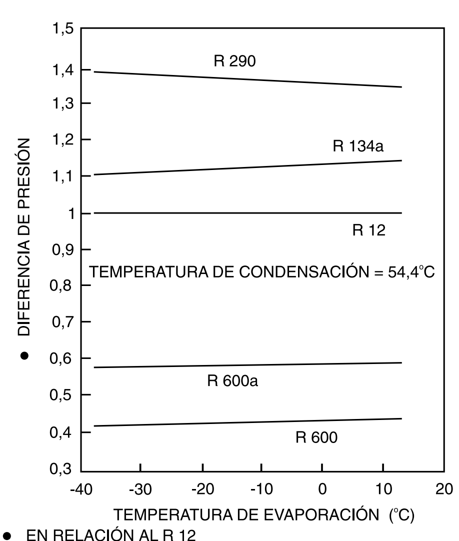



Fig. 1 - Comportamiento de presión de los refrigerantes hidrocarbonos y R 134a en relación al R 12, en función de la temperatura.

Como puedese observar en la figura 1, el isobutano (R 600a) y el butano (R 600) presentan menores presiones de vapor que el R 12, encuanto el propano (R 290) presenta mayores presiones.

En la figura 2 es presentado el comportamiento de una diferencia de presión (esfuerzo a que estarán sometidos los mancales del compresor), de los hidrocarbonos en función a la temperatura de evaporación.




Observase en la figura 2 que el propano (R 290) presenta mayores diferencias de presiones (esfuerzos mas grandes sobre los mancales del compresor) que el R 12, encuanto que e isobutano (R 600a) y el butano (R 600) presentan menores diferenciais de presión (menores esfuerzos sobre los mancales del compresor).

Asi, la utilización del propano en los sistemas de refrigeración, ocasionaria el redimensionamiento de los mancales y de otros componentes del compresor, como el sistema de válvulas de los actuales compresores para R 12.

Con el objectivo de comparar el desempeño de los refrigerantes hidrocarbonos en relacĩon al R 12 y R 134a, son presentadas en la Tabla 4, las principales características destes refrigerantes cuando analisados teóricamente en el ciclo de refrigeración ASHRAE.

TABLA 4 - Comparativo teórico entre R 12, R 134a y refrigerantes hidrocarbonos en el ciclo de refrigeración ASHRAE

| REFRIGERANTE | | R 12 | R 134a | R 290 | R 600a | R 600 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A - PRESIÓN DE EVAPORACIÓN (- 23,3°C) | bar | 1,321 | 1,152 (- 12,8%) | 2,165 (63,9%) | 0,624 (- 52,8%) | 0,389 (- 70,5%) |
| PRESIÓN DE CONDENSACIÓN (54,4°C) | bar | 13,470 | 14,710 (9,2%) | 18,860 (40,0%) | 7,614 (- 43,5%) | 5,563 (- 58,7%) |
| DIFERENCIA DE PRESIÓN | bar | 12,15 | 13,56 (11,6%) | 16,70 (37,4%) | 6,99 (-42,5%) | 5,17 (- 57,4%) |
| RAZON DE COMPRESIÓN | | 10,20 | 12,77 (25,2%) | 8,71 (- 14,6%) | 12,20 (19,6%) | 14,30 (40,2%) |
| DIFERENCIA DE ENTALPIA DE EVAPORACIÓN | kJ/kg | 143,60 | 186,90 (30,2%) | 353,40 (146,1%) | 336,00 (134,0%) | 365,30 (154,4%) |
| B - VOLUME ESPECÍFICO EN LA SUCCIÓN (60°C) | $m^3/kg$ | 0,1702 | 0,2322 (36,4%) | 0,2828 (66,2%) | 0,7554 (343,8%) | 1,2160 (591,2%) |
| FLUJO MASICO PARA 630 Btu/h | kg/h | 4,628 | 3,556 (- 23,2%) | 1,881 (- 59,4%) | 1,978 (- 57,3%) | 1,819 (- 60,7%) |
| DESPLAZAMIENTO VOLUMÉTRICO (3000 rpm) | $cm^3/rev$ | 4,376 | 4,587 (5,0%) | 2,955 (- 32,5%) | 8,301 (89,7%) | 12,288 (180,8%) |
| TEMPERATURA DE DESCARGA (ISOENTRÓPICA) | ºC | 157,8 | 147,9 (- 6,3%) | 143,9 (- 8,8%) | 129,8 (- 17,7%) | 133,1 (- 15,7%) |
| C - TEMPERATURA EN LA ENTRADA DEL DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN | ºC | 32,2 | 32,2 | 32,2 | 32,2 | 32,2 |
| VOLUME ESPECÍFICO | $dm^3/kg$ | 0,778 | 0,847 (8,9%) | 2,080 (167,3%) | 1,847 (137,4%) | 1,773 (127,9%) |
| FLUJO VOLUMÉTRICO | $dm^3/kg$ | 3,600 | 3,012 (- 16,3%) | 3,912 (8,7%) | 3,653 (1,5%) | 3,225 (- 10,4%) |

Nota: Eficiencia isoentrópica y volumétrica = 100%

Como se puede observar en la sección A de la tabla 4, la diferencia de entalpia de los refrigerantes hidrocarbonos es significativamente mas grande que a del R 12 y R 134a. Asi, un flujo menor de masa es necesario para se obtener una determinada capacidade de refrigeración.

En la sección B, observase que el propano (R 290) necesita una reducción en el desplazamiento volumétrico de la orden de 32,5% en relación al R 12, encuanto que el isobutano (R 600a) y el butano (R 600), necesitan un incremento en torno de 90% y 181%, respectivamente. Observase también, que los refrigerantes hidrocarbonos a ejemplo del R 134a, presentan menores temperaturas de descarga que el R 12.

Las condiciones del refrigerante en la entrada del dispositivo de expansión estan representadas en la sección C de la tabla 4. El flujo volumétrico del butano es alrededor de 10,4% inferior a del R 12, indicando que la resistencia al caudal en el tubo capilar debe ser incrementado. Con propano, el flujo volumétrico es de la orden de 8,7% superior al del R 12, encuanto que con el isobutano es de apenas 1,5%. Asi, ningún cambio parece ser necesario en el tubo capilar de los sistemas de refrigeración, cuando isobutano es utilizado como refrigerante.

Los principales impactos de cada refrigerante hidrocarbono sobre el compresor y el dispositivo de expansión de sistemas de refrigeración, basados en analisis teórica del ciclo ASHRAE, son resumidos en la tabla 5.

TABLA 5 - Principales características en relación al R 12 y el impacto de los refrigerantes hidrocarbonos en el proyecto de los compresores y dispositivos de expansión de los sistemas de refrigeración

| REFRIGERANTE | CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES EN RELACIÓN AL R 12 | IMPACTO SOBR EL COMPRESOR Y EL TUBO CAPILAR |
|---|---|---|
| PROPANO (R 290) | - Menor Desplazamiento Volumétrico (- 33%)<br>- Mayor Diferencia de Presión (37%)<br>- Mayor Flujo Volumétrico en el Tubo Capilar (8,7%) | - Reprojecto de los mancales, valvulas y otros componentes del compresor<br>- Redución de la resistencia al caudal de refrigerante en el tubo capilar |
| ISOBUTANO (R 600a) | - Mayor Desplazamiento Volumétrico (90%)<br>- Menor Diferencia de Presión (- 42%)<br>- Similar Flujo Volumétrico en el Tubo Capilar (1,5%) | - Reproyecto de los componentes del compresor<br>- Cambios en el tubo capilar parecen desnecesarias |
| BUTANO (R 600) | - Mayor Desplazamiento Volumétrico (181%)<br>- Menor Diferencia de Presión (- 57%)<br>- Menor Flujo Volumétrico en el Tubo Capilar (- 10,4%) | - Reproyecto de los componentes del compresor<br>- Aumento tamaño total del compresor<br>- Aumento de la resistencia al caudal de refrigerante en el tubo capilar |

A pesar de la necesidad de un mayor desplazamiento del compresor y del alto ponto de ebullición, el refrigerante isobutano esta siendo considerado como alternativa al refrigerante R 12. Esto debese al facto del sistema no requerer grandes alteraciones.

## 5 - COMPATIBILIDAD QUÍMICA COM MATERIALES

Los refrigerantes hidrocarbonos son compatibles con los materiales metálicos actualmente utilizados en los sistemas de refrigeración como acero, cobre, laton y aluminio.

Elastómeros como Teflon, Neoprene, Nylon, Vitons y algumas gomas nitrílicas, también son adecuados al uso de hidrocarbonos.

## 6 - ACEITE LUBRICANTE

Los aceites minerales y sintéticos, actualmente utilizados en sistemas de refrigeración con R 12, son compatibles con los refrigerantes hidrocarbonos.

Los aceites ester, debido a su característica biodegradable, también aparecen como candidatos al uso con hidrocarbonos, sinembargo, este tipo de aceite presenta alto costo, no es compatible con determinados compuestos químicos actualmente utilizados en los procesos de fabricación de compresores y componentes para sistema de refrigeración con R 12, ademas de exigir cuidados especiales en su manoseo debido a alta higroscopicidad.

## 7 - CARGA DE REFRIGERANTE

En sistemas de refrigeración que no sufriran cambios en los componientes la carga del refrigerante dependiendo del hidrocarbono utilizado, podrá ser 50-60% menor cuando comparada a la carga del R 12. Esta caracteristica, reduce los posibles riesgos de explosión o fuego en sistemas de refrigeración que utilizen hidrocarbonos como refrigerante.

## 8 - SEGURIDAD

El uso de refrigerantes inflamables en sistemas de refrigeración doméstica, incrementan los riesgos de explosión o fuego, y imponen la necesidad de se evaluar cuidadosamente todos los aspectos relacionados a seguridad.

EMBRACO, ciente de la importancia de tal analisis, hizo un extensivo plan de pruebas visando determinar los posibles riesgos envueltos con el uso de refrigerantes hidrocarbonos en sistemas de refrigeración doméstica.

**Nota:** Cuando retirados de un sistema de refrigeración, el compresor y sus accesorios no deben ser tirados al medio ambiente.
Los componentes deben ser reciclados conforme la clasificación de los materiales utilizados (ferrosos, no ferrosos, polímeros, aceites...).




Embraco hace parte del Pacto Global de las Naciones Unidas.